doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.01.03

中国西部大陆性冰川与海洋性冰川物质平衡变化及其对气候响应
——以乌源1号冰川和帕隆94号冰川为例①

牟建新[1]，李忠勤[1,2]，张慧[2,3]，徐春海[2,3]，金爽[2]，梁鹏斌[1]
（1 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070； 2 中国科学院西北生态环境资源研究院,冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川观测试验站,甘肃 兰州 730000； 3 中国科学院大学,北京 100049）

摘 要：为认识全球变暖背景下中国西部大陆性冰川与海洋性冰川物质平衡变化及其对气候响应，以天山乌鲁木齐河源1号冰川和藏东南帕隆94号冰川为例，结合大西沟与察隅站气象资料，对1980—2015年两条冰川的物质平衡变化特征及差异进行了分析。结果表明:36 a来乌源1号冰川与帕隆94号冰川物质平衡总体上均呈下降趋势，累积物质平衡达－17 102 mm w. e.与－8 159 mm w. e.，相当于冰川厚度减薄19 m与9.01 m，且分别于1996、2004年左右发生突变。同期两条冰川所处区域年均温呈显著上升趋势，而降水量却表现出不同的变化态势；二者年内气温分配相仿，但降水分配差异较大。初步分析认为气温上升是导致乌源1号冰川与帕隆94号冰川物质亏损的主要原因，冰川区气温和降水变化幅度的差异和地性因子(坡度、冰川面积)的不同使得乌源1号冰川对气候变化响应的敏感性高于帕隆94号冰川，由于目前海洋性冰川物质平衡监测时段相对较短，为深入研究中国西部冰川物质平衡变化及过程仍需加强对冰川的持续观测。

关 键 词： 物质平衡；大陆性冰川；海洋性冰川；乌源1号冰川；帕隆94号冰川；气候变化
文章编号： 1000－6060(2019)01－0020－09(0020～0028)

冰川物质平衡是冰川上物质收入与支出之间的关系[1]，比冰川面积变化、末端进退等对气候变化的响应更敏感[2]，是冰川学的传统观测及研究内容。在气候变暖的背景下，全球范围内冰川大都表现出负平衡状态下的退缩趋势，21世纪以来更为严重[3]。中国第二次冰川编目结果表明，过去50 a间，中国冰川总面积缩小了约18 %，平均面积退缩率达243.7 $km^2 \cdot a^{-1}$[4]。物质平衡作为引起冰川几何形态调整的物质基础，持续的负平衡将导致冰川的厚度减薄与面积萎缩。同时，物质平衡也是冰川动力学模型的关键输入参数，是定量评估冰川与气候变化关系的重要指标之一[5]。由于所处气候环境的不同，大陆性冰川与海洋性冰川对于气候变化的响应也不尽相同，而这种差异在物质平衡方面仍有待深入研究。

20世纪40年代，国际冰川学研究开始聚焦于冰川物质平衡的观测及其资料汇集，而中国也自50年代末以来，一直将冰川物质平衡作为重要研究内容[6]。1986年，世界冰川监测服务处(World Glacier Monitoring Service，WGMS)在瑞士苏黎世成立，负责全世界范围内冰川物质平衡和冰川变化数据的收集、整理及评估。然而，中国长期以来仅有大陆性冰川—天山乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称“乌源1号冰川”)入选WGMS的全球参照冰川。占现代冰川总面积约22 %的季风海洋性冰川[7]，有别于WGMS监测网络中多分布在大陆西岸或高纬度地区的海洋性参照冰川，但受自然地理环境的制约，目前已开展的观测研究相对较少[8-11]。随着近年来中国冰川学研究的深入发展，2015年WGMS发布的《Global Glacier Change Bulletin》数据集开始收录藏

① **收稿日期：** 2018－03－09； **修订日期：** 2018－06－27
基金项目： 国家自然科学基金重大研究计划(91425303)；国家自然科学基金(41471058，41771077，41641003)；中国科学院战略性先导科技专项(A类XDA2006020103)资助
作者简介： 牟建新(1994－)，男，甘肃陇南人，硕士研究生，主要从事冰川变化与冰川物质平衡研究. E-mail：mujianxin2012@163.com
通讯作者： 李忠勤，男，研究员，冰川学专业. E-mail：lizq@lzb.ac.cn

东南帕隆 94 号冰川(以下简称“帕隆 94 号冰川”)的物质平衡信息[12-13]。

关于两类冰川物质平衡变化的比较研究前人已有开展,王淑红等[14]对东西天山代表性冰川物质平衡变化的对比研究表明,尽管同属于大陆性冰川,但东天山的冰川物质平衡特性接近极大陆性冰川,而西天山的冰川物质平衡特性接近海洋性冰川;苏勃等[15]对天山与阿尔卑斯山典型冰川的阶段性物质平衡变化进行了比较,表明由于冰川所处水热条件不同,其物质平衡变化也存在较大差异;LIU 等[16]分析了天山 9 条有连续观测序列的冰川物质平衡变化特征,结果显示冰川大多在 20 世纪 70 年代后出现物质加速亏损的趋势,但不同冰川间物质平衡变化的幅度存在较大差异。相关研究多以欧亚大陆中部的天山冰川作为大陆性冰川代表,以发育于欧亚大陆西岸典型海洋性气候条件下的阿尔卑斯山冰川作为海洋性冰川代表,尚未涉及欧亚大陆东岸季风气候环境下发育的海洋性冰川,受季风与西风环流影响不同,东西岸冰川间的物质平衡状况也存在差异,而目前针对不同气候背景下冰川物质平衡的比较研究尚未考虑到这种差异。中国西部冰川分布众多,从西北干旱区的大陆性冰川到青藏高原边缘的季风海洋性冰川横跨欧亚大陆中、东部。因而可以通过对中国西部典型监测冰川的研究,来揭示欧亚大陆中部大陆性冰川与东部季风海洋性冰川物质平衡变化及其对气候响应的差异,目前相关研究尚缺乏。因此本文以乌源 1 号冰川和帕隆 94 号冰川的物质平衡资料为基础,对中国西部不同气候背景下两类典型冰川的物质平衡变化及其对气候响应的差异进行了分析,以期为进一步揭示全球变暖背景下冰川对气候的响应提供一定的借鉴作用。

1　研究区概况

选取中国西部物质平衡资料系列较长的两条冰川—乌源 1 号冰川与帕隆 94 号冰川(图 1)作为研究对象,分别代表西北干旱区的大陆性冰川与青藏高原边缘的海洋性冰川,直线距离约 1 770 km。其中,乌源 1 号冰川(43°07′N,86°49′E,编号为 5Y730C0029)位于中国天山中部天格尔峰北坡的乌鲁木齐河流域,海拔介于 3 743 ~ 4 484 m,末端朝向为 NE。冰川面积约 1.59 km²[17],1993 年后分为东、西两支,为典型的双冰斗—山谷冰川。冰川区主要受西风环流影响,属温带大陆性气候,降水集中于

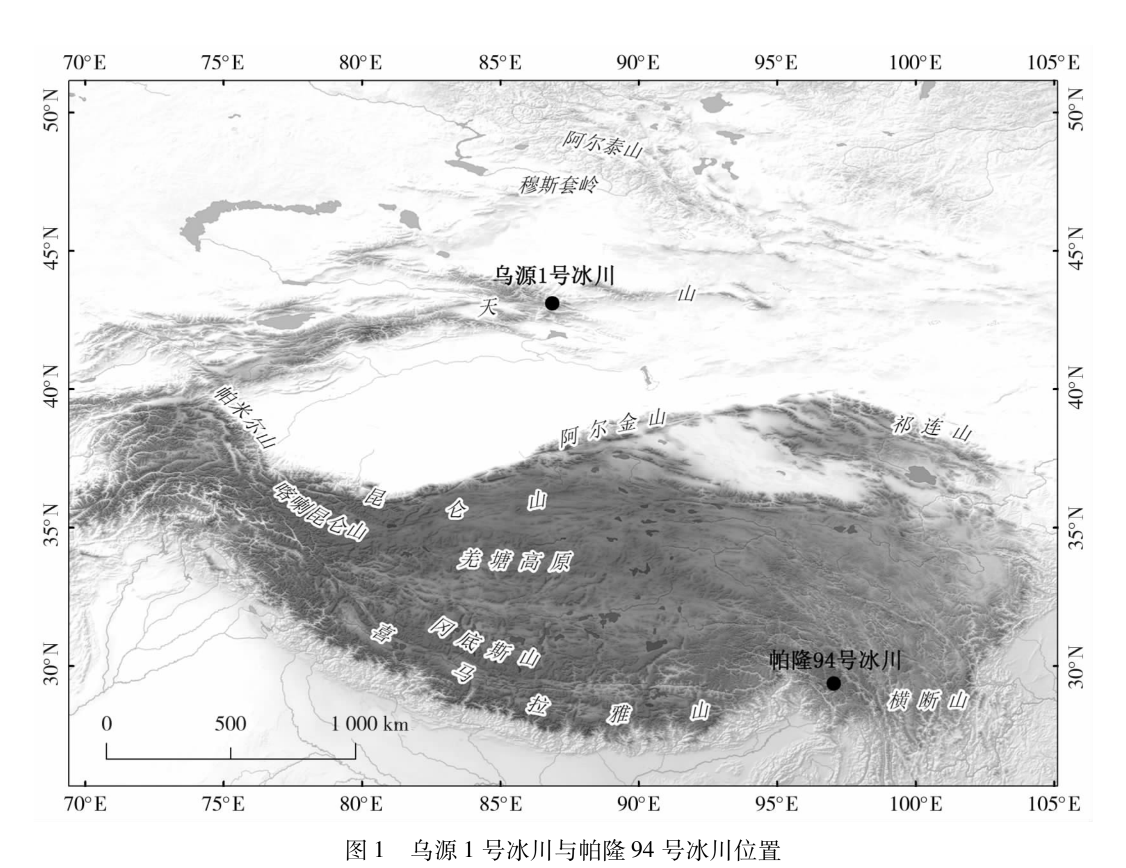


图 1　乌源 1 号冰川与帕隆 94 号冰川位置

Fig. 1　Location map of Urumqi Glacier No. 1 and Parlung No. 94 Glacier

夏季[18]，属"夏季积累型"冰川。乌源1号冰川的观测始于1959年，由中国科学院天山冰川观测试验站负责。帕隆94号冰川(29°23′N,96°58′E,编号为5O282A1094)位于青藏高原念青唐古拉山东部岗日嘎布山脉的帕隆藏布河源区，海拔介于5 000～5 635 m，末端朝向为NW，冰川面积约2.51 km^2，为典型的山谷冰川。冰川区处于季风进入青藏高原的重要水汽通道上，降水充沛，物质积累主要发生在春季[19]。帕隆94号冰川观测始于2006年，由中国科学院青藏高原研究所负责。前人研究表明，在过去几十年这两条冰川都经历了强烈的面积退缩[20-21]。

2 数据与方法

2.1 冰川物质平衡观测及数据来源

依据WGMS关于参照冰川物质平衡的观测规范要求，两条冰川物质平衡观测均采用传统的冰川学方法——"花杆—雪坑法"。物质平衡观测网的布设如图2所示，其中冰川边界来源于中国第二次冰川编目，花杆点资料来源于WGMS[13]，整条冰川的物质平衡计算均采用等高线法：

$$b_n = \sum_{i=1}^{n} S_i b_i / S \tag{1}$$

式中：b_n 为整条冰川的物质平衡；S_i、b_i 分别为两相邻等高线之间的投影面积和相应高程带的平均净平衡；n 为高程带数目；S 为冰川总面积。乌源1号冰川1980—2015年的物质平衡资料由中国科学院天山冰川观测试验站提供；帕隆94号冰川的物质平衡资料由WGMS及中国科学院青藏高原研究所提供，其中2006—2015年物质平衡为实测资料，1980—2005年物质平衡为重建资料[19,22]。

2.2 气象资料来源及梯度插补

天山大西沟气象站(43°06′N,86°50′E,3 539 m)距乌源1号冰川末端仅约2 km，因此选用该站点1980—2015年的气温及降水资料来反映该冰川所处区域的气候变化。帕隆94号冰川的气象监测时间较短(5 a)，因而采用距冰川相对较近的察隅站(29°39′N,97°28′E,2327 m)气象资料进行补充。其中气温垂直递减率取平均值[－0.6 ℃·(100 m)$^{-1}$]，而降水梯度则在综合前人观测及研究基础上[19,23]采取分段处理，4 600 m海拔处降水量约为察隅站83%，4 600 m至冰川末端的降水梯度为25%·(100 m)$^{-1}$。所用气象数据均源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)。

2.3 物质平衡与气象资料的趋势分析与突变性检验

采用一元线性回归与MK(Mann-Kendall)非参数检验方法对冰川物质平衡、气温及降水变化进行趋势分析与突变性检验，并利用滑动 T 检验和Yamamoto指数法对突变点进行真伪验证。

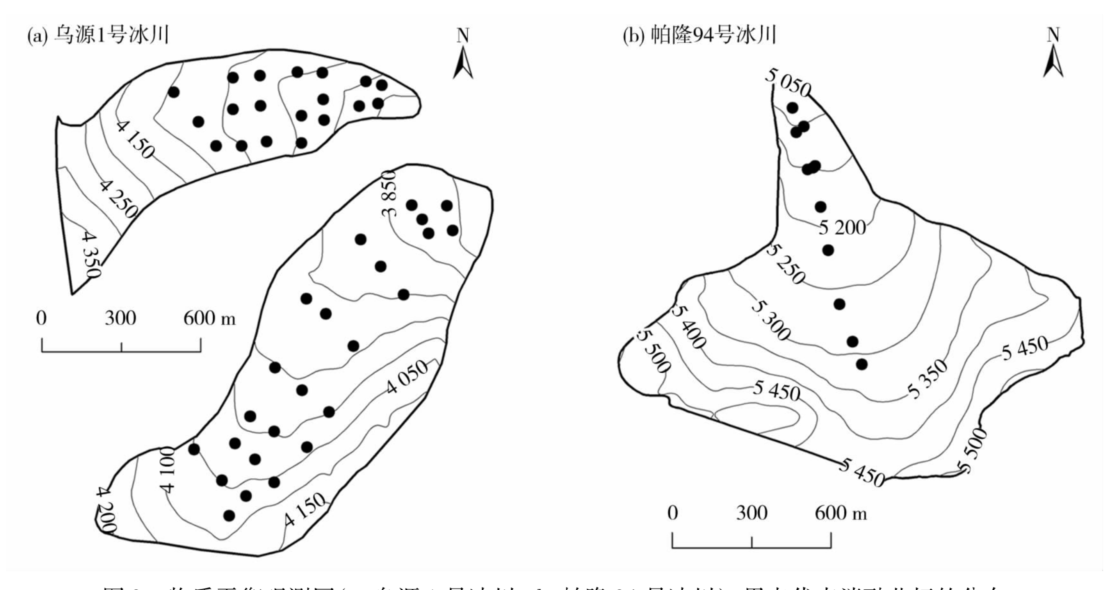


图2 物质平衡观测网(a. 乌源1号冰川；b. 帕隆94号冰川)，黑点代表消融花杆的分布

Fig. 2 Topography and observational network (a. Urumqi Glacier No. 1; b. Parlung No. 94 Glacier), The black dots represent the distribution of ablation stakes

3 结果

3.1 物质平衡、平衡线高度和积累区面积比率变化

1980—2015年乌源1号冰川物质平衡在－1 327～106 mm w. e.之间波动(图3a),年均物质平衡为－475 mm w. e.,且总体下降趋势显著($P < 0.01$),倾向率为－15.70 mm w. e. ·a^{-1}。36 a的记录中,负平衡年共30 a,正平衡年共6 a。物质平衡10 a滑动平均曲线显示,1980—1991年冰川物质平衡波动较小,呈缓慢上升趋势,而1991年后表现出明显下降趋势。

同期帕隆94号冰川物质平衡介于－1 930～736 mm w. e.(图3b),年均物质平衡为－227 mm w. e.,下降趋势显著($P < 0.001$),倾向率达－35.15 mm w. e. ·a^{-1}。36 a中负平衡年共20 a,正平衡年共16 a。10 a滑动平均曲线显示,1980—2000年冰川物质平衡波动幅度较小,呈小幅下降趋势,但2000年之后表现出明显下降趋势。36 a间乌源1号冰川和帕隆94号冰川累积物质平衡分别为－17 102与－8 159 mm w. e.,相当于冰川厚度分别减薄约19与9.01 m。

MK检验结果表明,乌源1号冰川物质平衡的UF曲线在1996年之前呈波状缓慢上升,1996年后下降趋势显著(图4a)。在0.05的信度下,物质平衡于1996年左右发生突变,1980—1996年年均物质平衡为－249 mm w. e.,1996—2015年年均物质平衡为－677 mm w. e.,突变前后年均物质平衡减少了428 mm w. e.。

帕隆94号冰川物质平衡的UF曲线在2002年之前波动较大,之后呈现出明显的持续下降趋势(图4b)。在0.05的信度下,物质平衡于2004年左右发生突变,突变前年均物质平衡为48 mm w. e.,突变后物质平衡减少到－850 mm w. e.,突变前后年均物质平衡减少了898 mm w. e.。

2006—2015年乌源1号冰川平衡线高度介于3 990～4 484 m,2010年平衡线高度抵达冰川最高

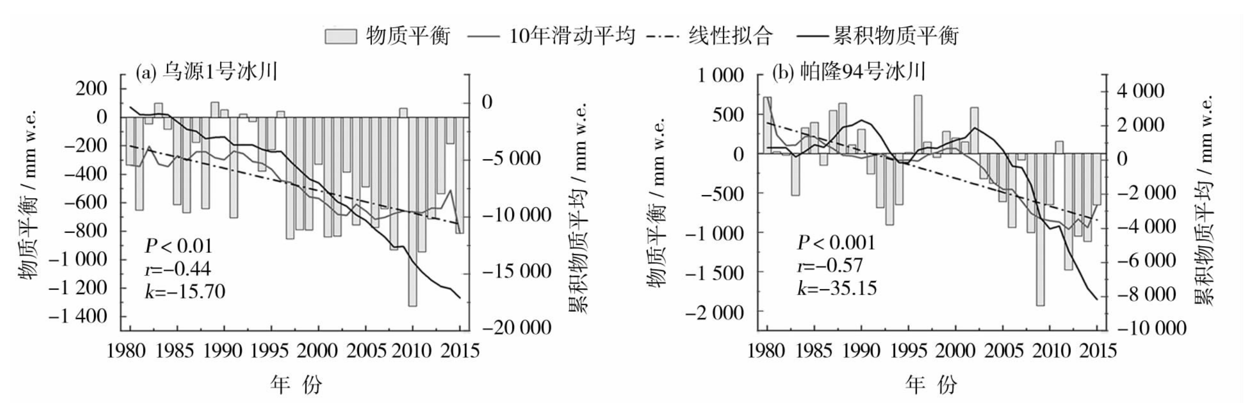


图3 1980—2015年冰川物质平衡与累积物质平衡变化(a.乌源1号冰川; b.帕隆94号冰川)

Fig. 3 Variation of annual mean mass balance and cumulative mass balance (a. Urumqi Glacier No. 1; b. Parlung No. 94 Glacier)

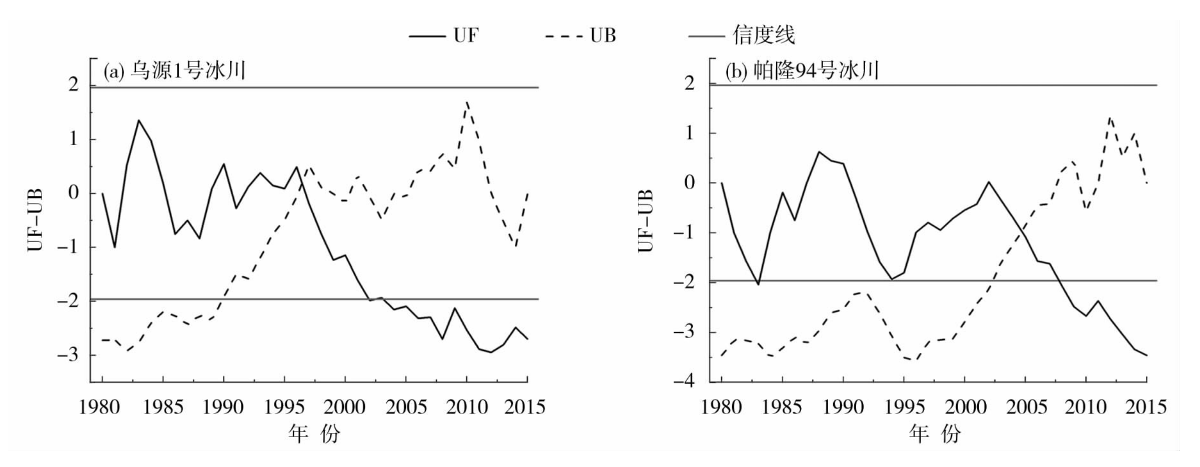


图4 冰川物质平衡的MK检验(a.乌源1号冰川; b.帕隆94号冰川)

Fig. 4 Mann-Kendall mutation test of mass balance (a. Urumqi Glacier No. 1; b. Parlung No. 94 Glacier)

海拔，即整条冰川无积累区存在，其余年份的积累区面积比率变化介于10% ~64%，平均平衡线高度为4 129 m，距冰川最高海拔463 m。10 a中该冰川平衡线高度上升约78 m，积累区面积比率减少9%。帕隆94号冰川2009、2012年积累区面积比率均为0，其余年份的积累区面积比率变化介于14% ~69%，相应的平衡线高度变化介于5 312 m ~5 460 m，平均平衡线高度为5 410 m，距冰川最高海拔仅剩297 m。平衡线高度与物质平衡的线性回归表明(图5)：乌源1号冰川平衡线高度对于物质平衡变化的敏感性0.18 m·(w.e.)$^{-1}$高于帕隆94号冰川0.11 m·(w.e.)$^{-1}$。

3.2 冰川区气候变化

1980—2015年乌源1号冰川与帕隆94号冰川所处区域年均气温均呈显著上升趋势($P<0.001$)(图6)，倾向率分别为0.5 ℃·(10 a)$^{-1}$和0.3 ℃·(10 a)$^{-1}$，多年平均气温分别为－4.8 ℃和－3.9 ℃。气温的四季变化也均表现出上升趋势。乌源1号冰川春季增温最显著[0.6 ℃·(10 a)$^{-1}$，$P<0.0005$]，其次是夏季[0.5 ℃·(10 a)$^{-1}$，$P<0.0005$]和秋季[0.5 ℃·(10 a)$^{-1}$，$P<0.005$]，冬季最低[0.2 ℃·(10 a)$^{-1}$]。帕隆94号冰川冬季增温幅度最大[0.4 ℃·(10 a)$^{-1}$]，其次是春季[0.3 ℃·(10 a)$^{-1}$，$P<0.01$]和秋季[0.3 ℃·(10 a)$^{-1}$，$P<0.01$]，夏季最小[0.2 ℃·(10 a)$^{-1}$，$P<0.05$]。MK突变检验表明，在0.05的信度下，乌源1号冰川年均温于1996年左右发生突变，而帕隆94号冰川的气温突变点出现在2000年前后。

同期乌源1号冰川年降水量呈显著增加趋势[34 mm·(10 a)$^{-1}$，$P<0.05$]，而帕隆94号冰川年降水量则表现出减少的趋势[－57 mm·(10 a)$^{-1}$]，多年平均降水量分别为475 mm和1 289 mm。

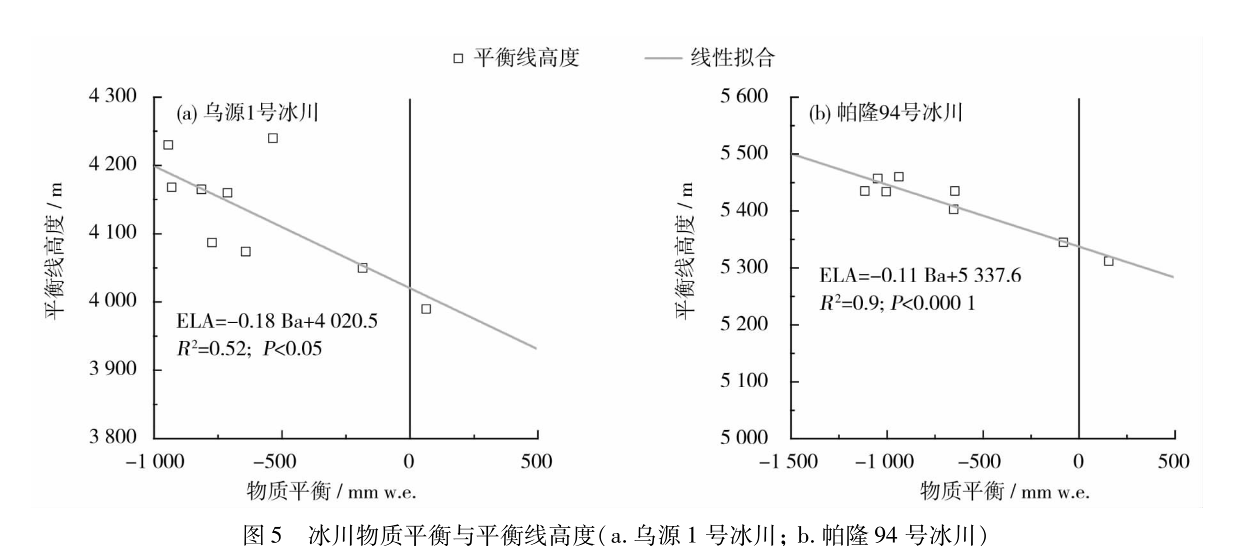


图5 冰川物质平衡与平衡线高度(a. 乌源1号冰川；b. 帕隆94号冰川)

Fig. 5 Equilibrium line altitude versus specific mass balance for the whole observation period (a. Urumqi Glacier No. 1; b. Parlung No. 94 Glacier)

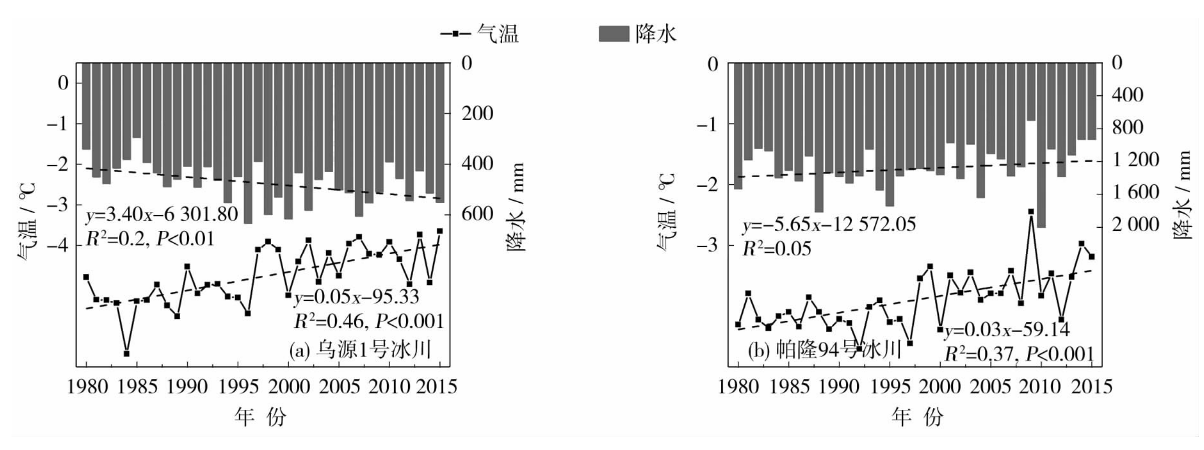


图6 气温及降水的年际变化(a. 乌源1号冰川；b. 帕隆94号冰川)

Fig. 6 Interannual variation of temperature and precipitation (a. Urumqi Glacier No. 1; b. Parlung No. 94 Glacier)

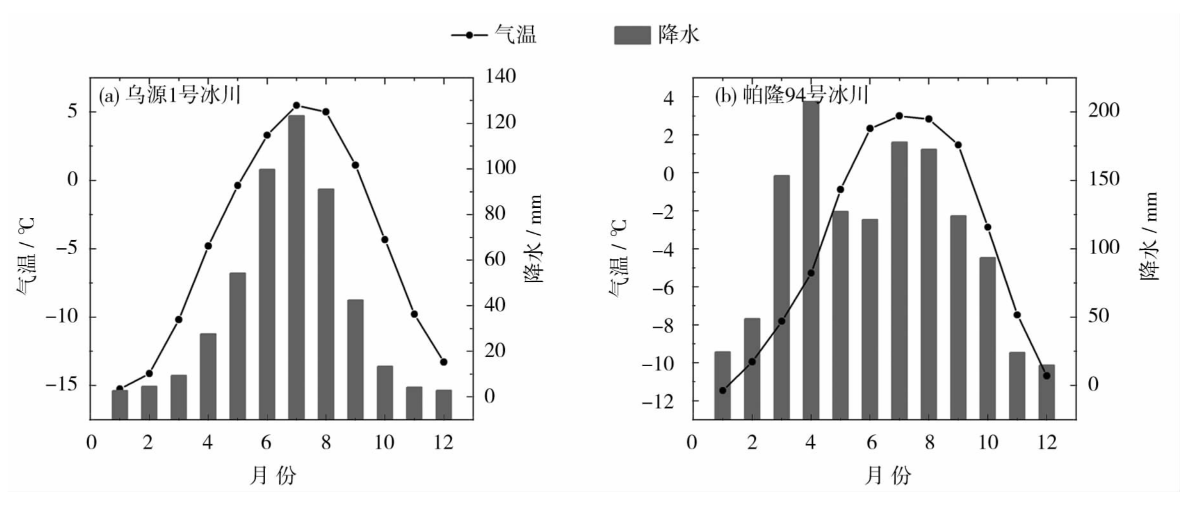


图7 气温及降水的月变化(a. 乌源1号冰川;b. 帕隆94号冰川)

Fig. 7 Monthly variation of temperature and precipitation (a. Urumqi Glacier No. 1; b. Parlung No. 94 Glacier)

降水量的季节变化方面,乌源1号冰川四季降水量均表现出增加趋势,其中夏季降水增幅最大[5.7 mm·(10 a)$^{-1}$],其次是春季[4.9 mm·(10 a)$^{-1}$, $P<0.001$]和秋季[0.7 mm·(10 a)$^{-1}$],冬季[0.03 mm·(10a)$^{-1}$]最小。帕隆94号冰川四季降水量均呈减少趋势,其中秋季[-5.6 mm·(10 a)$^{-1}$]和夏季[-5.5 mm·(10 a)$^{-1}$]减少幅度较大,春季和冬季较小[-3 mm·(10 a)$^{-1}$]。MK突变检验表明,在0.05的信度下,乌源1号冰川的年降水量在1988年左右发生突变,帕隆94号冰川的年降水量在1982、2009年前后发生突变。

气温和降水的年内变化表明(图7):乌源1号冰川和帕隆94号冰川气温的年内分配相仿,最高温均出现在夏季。而降水的年内分配差异较大,乌源1号冰川呈"单峰型",全年降水的66%集中于夏季;而帕隆94号冰川呈"双峰型",全年降水的38%集中在春季,37%集中于夏季。

4 讨论

1980—2015年乌源1号冰川与帕隆94号冰川物质平衡总体上均呈下降趋势,但在物质亏损量及年际波动上存在差异。36 a间乌源1号冰川累计物质亏损量约为帕隆94号冰川的2倍,且物质平衡的突变年份早于帕隆94号冰川出现,即早于帕隆94号冰川进入加速亏损状态,但年均物质亏损速率低于帕隆94号冰川。研究时段内两条冰川所处区域的气温均表现出显著上升趋势,而降水量的年际波动态势差异较大。此外冰川区年内气温分配较为一致,高温期均集中于在夏季,但降水分配差异明显。物质平衡与气温、降水的相关性分析表明(表1):乌源1号冰川物质平衡与气温呈负相关($r=-0.58$, $P<0.01$),而与降水的相关性较差($r=-0.07$),帕隆94号冰川物质平衡与气温呈负相关($r=-0.4$, $P<0.05$),而与降水呈正相关($r=0.36$, $P<0.05$),总体而言,相较于降水,物质平衡与气温间的相关性更高。由于36 a间乌源1号冰川无论年均温还是夏季气温,其上升幅度都高于帕隆94号冰川,因而

表1 乌源1号冰川和帕隆94号冰川物质平衡与气温(Rt_{urumqi}、$Rt_{parlung}$)、降水(Rp_{urumqi}、$Rp_{parlung}$)的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients of annual mean mass balance versus monthly temperature (Rt_{urumqi}、$Rt_{parlung}$) and monthly precipitation (Rp_{urumqi}、$Rp_{parlung}$), level, respectively

月份	Rt_{urumqi}	Rp_{urumqi}	$Rt_{parlung}$	$Rp_{parlung}$
1	0.07	-0.23	-0.17	-0.18
2	-0.26	0.05	-0.03	-0.2
3	-0.3	0.05	-0.12	0.12
4	-0.47**	-0.06	-0.09	0.12
5	-0.24	-0.18	-0.23	0.34*
6	-0.54**	0.1	-0.26	0.09
7	-0.62**	0.11	-0.57**	0.14
8	-0.52**	-0.19	-0.41*	0.11
9	-0.18	-0.04	-0.39*	0.06
10	-0.26	-0.05	-0.2	0.28
11	-0.31	-0.23	-0.13	0.1
12	-0.08	-0.35*	-0.2	0.18
年均	-0.58**	-0.07	-0.40*	0.36*

注:*:$P<0.05$, **:$P<0.01$

物质平衡表现出对全球气候变暖更敏感的响应。

冰川物质平衡变化不仅受区域气候环境影响，还取决于冰川所处地形条件[24]。研究表明，冰川坡度及面积是影响冰川对气候变化响应的重要地形因子[25]。坡度是影响冰川流速的关键因素，坡度越大，则冰川从积累区至消融区的物质迁移速度越快，在负平衡状态下，冰体快速从积累区移动到消融区进行补给，直至冰川再次达到平衡条件，第二次冰川编目表明，乌源 1 号冰川平均坡度为 21.4 °，帕隆 94 号冰川平均坡度为 16.8 °，这使得乌源 1 号冰川较帕隆 94 号冰川对于气候变化的响应时间更短。从面积方面来看，尽管冰川表面具有较高的反照率，热量传输较低，但在山谷冰川中，由于沿着山谷斜坡的基岩可吸收大量的太阳辐射并将其传导到冰体，因而冰川面积越大，周边岩体接收的能量传输至冰体中心的速度就越慢，对于气温上升的反应就越滞后，乌源 1 号冰川面积明显低于帕隆 94 号冰川，因而对气候变化的响应更为及时。由于气候和地形因子共同影响着冰川对于气候变化的响应，针对两者的定量评估将成为下一步研究的重点。另外，由于帕隆 94 号冰川物质平衡监测时段还相对较短，本文在研究中采用了部分重建资料，所得海洋性冰川物质平衡与大陆性冰川物质平衡结果的比较与前人研究存在差异[8,15]，从帕隆 94 号冰川表面特征来看，其与中国西部典型海洋性冰川—白水 1 号冰川相比（图 8），冰川表面冰裂隙发育较少，海洋性特征不显著，更类似于亚大陆性冰川。总的来说，为深入认识冰川与气候变化间的反馈机制，加强对冰川物质平衡的持续观测，特别是海洋性冰川，仍具有不可替代的作用。





图 8　帕隆 94 号冰川（a）和白水 1 号冰川（b）照片，摄于 2017 年

Fig. 8　Photographs of Parlung No. 94 Glacier (a) and Baishui Glacier No. 1 (b), taken in 2017

5　结 论

（1）1980—2015 年乌源 1 号冰川与帕隆 94 号冰川物质平衡均呈下降趋势，但在物质亏损幅度及变化特征上有所不同。36 a 间乌源 1 号冰川与帕隆 94 号冰川累积物质平衡分别达 −17 102 mm w. e. 与 −8 159 mm w. e.，相当于冰川厚度分别减薄 19 m 与 9.01 m，且分别于 1996、2004 年左右发生突变。同期乌源 1 号冰川与帕隆 94 号冰川所在区域年均温呈明显上升趋势 0.5 ℃·(10 a)$^{-1}$和 0.3 ℃·(10 a)$^{-1}$，且于 1996、2000 年前后发生突变。降水量变化趋势差异显著，乌源 1 号冰川年降水量呈增加趋势，增幅为 34 mm·(10 a)$^{-1}$，且于 1988 年左右发生突变，帕隆 94 号冰川年降水量呈减少趋势，减少了 −57 mm·(10 a)$^{-1}$，于 1982、2009 年前后发生突变。冰川区气温的年内分配相仿，但降水分配差异较大。

（2）初步研究表明，气温上升是导致乌源 1 号冰川与帕隆 94 号冰川物质亏损的主要原因。受区域间气候（气温、降水）和地形（坡度、面积）因子差异的影响，乌源 1 号冰川对气候变化响应的敏感性高于帕隆 94 号冰川，考虑到目前海洋性冰川物质平衡监测时段相对较短，加强对冰川物质平衡的持续观测是今后深入研究中国西部冰川物质平衡变化及过程必要的基础性工作。

致谢：特别感谢中国科学院青藏高原研究所杨威老师提供的帕隆 94 号冰川物质平衡资料，对

于天山冰川站不同时期观测人员的辛勤工作一并表示感谢。

参考文献(References)

[1] 秦大河,姚檀栋,丁永建,等. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京:气象出版社,2014. [QIN Dahe,YAO Tandong,DING Yongjian,et al. Glossary of cryosphere science[M]. Beijing:China Meteorological Press,2014.]

[2] ZEMP M,ROER I,KAAB A,et al. Global glacier changes:Facts and figures[M]. World Glacier Monitoring Service,Zürich,Switzerland,2008.

[3] ZEMP M,FREY H,GARTNER-ROER I,et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century[J]. Journal of Glaciology,2015,61(228):745－762.

[4] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报,2015,70(1):3－16. [LIU Shiyin,YAO Xiaojun,Guo Wanqin,et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(1):3－16.]

[5] 李慧林,李忠勤,秦大河. 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南[M]. 北京:气象出版社,2009. [LI Huilin,LI Zhongqin,QIN Dahe. Basic principles of glacier dynamic models and observation guide for corresponding parameters[M]. Beijing:China Meteorological Press,2009.]

[6] 谢自楚,刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海:上海科学普及出版社,2010. [XIE Zichu,LIU Chaohai. Introduction of glacial science[M]. Shanghai:Shanghai Popular Science Press,2010.]

[7] SU Zhen,LIU Shiyin. Response of monsoonal temperate glaciers to global warming since the Little Ice Age[J]. Quaternary International,2002,97:123－131.

[8] 杜建括,何元庆,李双,等. 横断山区典型海洋型冰川物质平衡研究[J]. 地理学报,2015,70(9):1415－1422. [DU Jiankuo,HE Yuanqing,Li Shuang,et al. Mass balance of a typical monsoonal temperate glacier in Hengduan Mountains Region[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(9):1415－1422.]

[9] 李宗省,何元庆,贾文雄,等. 全球变暖背景下海螺沟冰川近百年的变化[J]. 冰川冻土,2009,31(1):75－81. [LI Zongxing,HE Yuanqing,JIA Wenxiong,et al. Changes in Hailuogou Glacier during the recent 100 years under global warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2009,31(1):75－81.]

[10] 刘伟刚. 珠穆朗玛峰绒布冰川文气象特征及径流模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学,2010. [LIU Weigang. Hydrometeorological characteristics and runoff simulation in the Rongbuk Glacier catchment in Mt. Qomolangma,Central Himalayas,China[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences,2010.]

[11] 杨威,姚檀栋,徐柏青,等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩[J]. 科学通报,2008,53(17):2091－2095. [YANG Wei,YAO Tandong,XU Baiqing,et al. Graveness waste and retreat of glacier in Gangrigabu region southeast of Qinghai Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin,2008,53(17):2091－2095.]

[12] ZEMP M,GARTNER-ROER I,NUSSBAUMER S,et al. Global glacier change bulletin No. 1 (2012—2013)[M]. Switzerland:World Glacier Monitoring Service,2015.

[13] ZEMP M,NUSSBAUMER S,GARTNER-ROER I,et al. Global Glacier change bulletin No. 2 (2014—2015)[M]. Switzerland:World Glacier Monitoring Service,2017.

[14] 王淑红,谢自楚,李巧媛. 近期东西天山冰川变化的对比研究[J]. 冰川冻土,2008,30(6):946－953. [WANG Shuhong,XIE Zichu,LI Qiaoyuan. Comparison study of glacier variations in East and West Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2008,30(6):946－953.]

[15] 苏勃,李忠勤,张明军,等. 大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡对比研究——以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例[J]. 冰川冻土,2015,37(5):1131－1140. [SU Bo,LI Zhongqin,ZHANG Mingjun,et al. A comparative study on mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers:Taking the typical glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps as examples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(5):1131－1140.]

[16] LIU Qiao,LIU Shi. Response of glacier mass balance to climate change in the Tianshan Mountains during the second half of the twentieth century[J]. Climate Dynamics,2016,46(1－2):301－316.

[17] WANG P,LI Z,LI H,et al. Analyses of recent observations of Urumqi Glacier No. 1,Chinese Tianshan Mountains[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(8):720.

[18] 张国飞,李忠勤,王文彬,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1959—2009年物质平衡变化过程及特征研究[J]. 冰川冻土,2012,34(6):1301－1309. [ZHANG Guofei,LI Zhongqin,WANG Wenbin,et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Urümqi Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River,Tianshan Mountains,during 1959—2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34(6):1301－1309.]

[19] YANG Wei,YAO Tandong,GUO Xiaofeng,et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres,2013,118(17):9579－9594.

[20] 姚红兵,李忠勤,王璞玉,等. 近50 a天山乌鲁木齐河源1号冰川变化分析[J]. 干旱区研究,2015,32(3):442－447. [YAO Hong Bin,LI Zhongqin,WANG Puyu,et al. Area variation analysis of Urumqi Glacier No. 1 in past 50 decades[J]. Arid Zone Research,2015,32(3):442－447.]

[21] YANG Wei,YAO Tandong,XU Baiqing,et al. Characteristics of recent temperate glacier fluctuations in the Parlung Zangbo River basin,southeast Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin,2010,55(20):2097－2102.

[22] YANG Wei,GUO Xiaofeng,YAO Tandong,et al. Recent accelerating mass loss of southeast Tibetan Glaciers and the relationship with changes in macroscale atmospheric circulations[J]. Climate Dynamics,2016,47(3－4):805－815.

[23] 鲁春霞,王菱,谢高地,等. 青藏高原降水的梯度效应及其空间分布模拟[J]. 山地学报,2007,25(6):655－663. [LU Chunxia,WANG Ling,XIE Gaodi,et al. Altitude effect of precipitation and spatial distribution of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science,2007,25(6):655－663.]

[24] OERLEMANS J, ANDERSON B, HUBBARD A, et al. Modelling the response of glaciers to climate warming[J]. Climate Dynamics, 1998, 14(4): 267 – 274.

[25] XU X, PAN B, HU E, et al. Responses of two branches of Glacier No. 1 to climate change from 1993 to 2005, Tianshan, China[J]. Quaternary International, 2011, 236(1 – 2): 143 – 150.

Mass balance variation of continental glacier and temperate glacier and their response to climate change in western China: Taking Urumqi Glacier No. 1 and Parlung No. 94 Glacier as examples

MU Jian-xin[1], LI Zhong-qin[2,1], ZHANG Hui[2,3], XU Chun-hai[2,3], JIN Shuang[2], LIANG Peng-bin[1]

(1 *College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *GansuChina*; 2 *State Key Laboratory of Cryospheric Science/Tianshan Glaciological Station, Northwest Institution of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Glacier mass balance is a key parameter for monitoring strategies of the earth climate system, due to its direct and undelayed response to local atmospheric conditions. Considering the reliability of mass balance observation and data quality, Urumqi Glacier No. 1 (UG1) in the Tianshan Mountains and Parlung No. 94 Glacier (PG94) in the Gangrigabu Range are selected as the reference glacier of continental glacier in northwest arid region and temperate glacier in southeast Tibetan Plateau of China, respectively. Thus, it is reasonable to take UG1 and PG94 as sample glaciers to indicate the mass balance fluctuation for continental glacier and temperate glacier and their response to climate change in western China. Combined with meteorological data of Daxigou and Zayu station, glacier mass balance variation and discrepancy for UG1 and PG94 from 1980 to 2015 are analyzed. The results indicated that the annual mass balance for UG1 and PG94 show a decreasing trend by –15.70 ($P<0.01$) and –35.15 mm w. e. a^{-1} ($P<0.001$), respectively. The cumulative mass balance for UG1 and PG94 are found to be –17 102 and –8 159 mm w. e. in 36 years, equivalent to ice thickness reduced by 19 m and 9.01 m. Their mutation points occurred in 1996 and 2004 at the 0.05 level, respectively. The annual mean temperature for UG1 and PG94 show a significant increasing trend by 0.5 ℃ · $(10\ a)^{-1}$ and 0.3 ℃ · $(10\ a)^{-1}$, ($P<0.001$) respectively over the study period. And their mutation points occurred in 1996 and 2000 at the 0.05 level, respectively. The annual precipitation for UG1 and PG94 show a different trend in 36 years, an increasing trend [34 mm · $(10\ a)^{-1}$, $P<0.05$] is found for UG1, while PG94 exhibits a decreasing trend [–57 mm · $(10\ a)^{-1}$]. The mutation point of annual precipitation occurred in 1988 for UG1, while for PG94 it was in 1982 and 2009 at the 0.05 level. The inner – annual distribution of air temperature for UG1 and PG94 are almost similar, but inner – annual precipitation distribution is different in two glacial regions. There were 66% of annual precipitation concentrated in summer period for UG1, while spring and summer precipitation accounted for 38% and 37% of the annual precipitation in PG94, respectively. The correlation analysis between glacier mass balance and temperature and precipitation of UG1 and PG94 show that mass balance are more closely with temperature in term of precipitation, especially for summer temperature. The response of glacier mass balance is not only affected by the regional climate conditions, but also depends on the topographic conditions. It is higher in UG1 than that of PG94 owing to the increase of annual mean and summer temperature of UG1 in the past 36 years. Furthermore, UG1 has larger slopes and smaller area than PG94, making the UG1 more sensitive to the recent climate warming. Considering the monitoring history of temperate glacier mass balance is relatively short, it is still necessary to strengthen glacier mass balance observation, which could provide a scientific data to understand the changes and processes of glacier mass balance in western China.

Key words: glacier mass balance; continental glaciers; temperate glaciers; Urumqi Glacier No. 1; Parlung No. 94 Glacier; climate change